

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ. ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

Разработка лазерного генератора на основе аналога матрицы ШпольскогоЮ. К. Алешин,^{1,а} Д. Ю. Ципенюк,^{2,б} В. Н. Платонов,² А. В. Воропинов³¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.² Институт общей физики имени А. М. Прохорова РАН. Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, д. 38.³ ООО «Лазер График». Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, д. 38.

Поступила в редакцию 14.09.2018, после доработки 29.10.2018, принята к публикации 31.10.2018.

В статье рассмотрены возможности и перспективы лазерной генерации в охлажденных до криогенных температур активных средах на основе органических красителей. Полученные результаты демонстрируют возможность создания высокоэффективных активных лазерных сред (на основе аналога матрицы Шпольского) на базе охлажденных углеродсодержащих матриц.

Ключевые слова: лазерная генерация, криогенная температура, матрица Шпольского.

УДК: 535.8, 535.015, 53.096. PACS: 42.55.-f.

ВВЕДЕНИЕ

В литературе под эффектом Шпольского подразумевается возникновение квазилинейчатых электронно-колебательных спектров сложных органических соединений, растворенных особым образом в специально подобранных растворителях, охлажденных затем до низких температур [1, 2]. Данное явление было обнаружено в 1952 г. Э. В. Шпольским и его сотрудниками. При нормальных условиях спектры сложных органических соединений представляют собой сплошные широкие полосы, извлечь информацию из них о строении этих молекул и их составе невозможно. Эффект Шпольского позволяет анализировать спектры, состоящие из узких спектральных линий и дает возможность изучать такие объекты.

Применение эффекта Шпольского дало возможность широкому развитию оптической селективной лазерной спектроскопии примесных молекул в твердых средах [3]. В настоящее время оптическая спектроскопия примесных молекул в твердых растворах является востребованным инструментом, применяемым для решения задач в физике, физической химии, квантовой оптике, биофизике и оптике.

В работе [4] описано применение данной методики, включая использование узких неоднородно уширенных линий в матрицах Шпольского для метода селективного лазерного возбуждения спектров люминесценции и метода выжигания стабильных спектральных провалов, а также для спектроскопии одиночных молекул, позволяющие устранить усреднение данных по объему исследуемого образца. Вышеперечисленные методы проявили себя в качестве эффективных инструментов для исследования твердых сред с различной степенью неупорядоченности в структуре.

Авторы в работе [5] предположили возможность создания активных лазерных сред, основанных на аналоге матрицы Шпольского, и провели серию экспериментов по проверке данной гипотезы. Для этих целей была создана экспериментальная установка, позволяющая изучать люминесценцию матриц, охлажденных до криогенных температур.

Основой для проведенных экспериментов послужили более ранние исследования по изучению нелинейных оптических свойств наноструктурированных матриц на основе искусственного опала SiO_2 , заполненных различными жидкостями на основе органических веществ (ацетон, этанол) и замороженных до температуры жидкого азота [6, 7]. В качестве образцов использовались опаловые матрицы, представляющие собой плотно упакованную трехмерную кристаллическую структуру, состоящую из наносфер (глобул) кремнезема диаметром 245, 270, 290 и 315 нм. Образцы опаловых матриц и нанокомпозитов имели размеры порядка нескольких миллиметров и были вырезаны параллельно плоскости (111). В ходе проведенных экспериментов был исследован обнаруженный ранее эффект «фотонного пламени», заключающийся в послесвечении в видимой сине-зеленой области спектра длительностью от 1 до 12 с при возбуждении замороженных матриц образцов сфокусированным излучением гигантского импульса рубинового лазера ($\lambda = 694.3$ нм, $\tau = 20$ нс, $E_{\text{max}} = 0.3$ Дж, спектральная ширина линии генерации 0.015 см^{-1}) [8, 9]. Исследование нелинейно-оптических эффектов в опаловых матрицах показало наличие таких эффектов, как эффект фотонного пламени, вынужденное глобулярное рассеяние света, вынужденное комбинационное рассеяние света.

При дальнейшем изучении эффекта фотонного пламени в матрицах искусственных опалов с заполненными органическими жидкостями пустотами между кварцевыми сферами (диаметром от 150 до 250 нм) показана возможность получения сверхдлительного послесвечения образцов без использования лазерного излучения в качестве накачки. Для получения эффекта сверхдлительного свечения охлажденных до криогенных температур образцов органических материалов оказалось достаточно использование непрерывного излучения накачки от ртутной лампы. В качестве исследуемых образцов применялись замороженные до криогенных температур чистые органические жидкости без применения опаловой матрицы. Одним из возможных объяснений такого послесвечения может служить механизм, аналогичный эффекту Шпольского [5]. Необходимо отметить, что похожее явление длительного послесвечения было обнаружено в чистом жидком азоте в сине-зеленой области под воздействием ультрафиолетового излучения [10, 11].

^а E-mail: vovur@mail.ru

^б E-mail: tsip@kapella.gpi.ru

В результате авторы пришли к идее создания активной лазерной среды на базе матриц Шпольского, охлажденных до криогенных температур. В представленной статье обсуждается возможная схема лазерной генерации на основе обнаруженного эффекта и ожидаемые параметры такой генерации.

1. АКТИВНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СРЕДА НА ОСНОВЕ МАТРИЦЫ ШПОЛЬСКОГО

Для исследования параметров перспективных активных лазерных сред на основе матриц Шпольского была собрана экспериментальная установка (рис. 1). В качестве источника накачки в установке применялись попеременно импульсный YAG:Nd³⁺-лазер с удвоителем частоты 1.2 (длина волны излучения 1064, 532 нм, 15 мДж/имп, 15 нс длительность, частота повторения 50 Гц), или ртутная лампа. Излучение накачки через поворотное зеркало 2 фокусировалось на поверхность исследуемого образца 6. Исследуемые образцы были помещены на поверхность металлического хладапровода 5, частично погруженного в жидкий азот 4, который был налит в открытую сверху кювету-термос 3. Время облучения образцов излучением накачки варьировалось и составляло в различных экспериментальных сериях от нескольких минут до 5 с. Люминесценция образцов 6 регистрировалась цифровым спектроанализатором 8, сопряженным с компьютером 9 или фотоаппаратом 10 после выключения излучения накачки.

На рис. 2 приведена зафиксированная с помощью цифровой камеры Nikon Coolpix 990 последовательность из 16 кадров с экспозицией каждого кадра 2 с люминесценции образца опаловой матрицы размером $0.8 \times 0.8 \times 0.8$ см (по данным электронной спектроскопии диаметр опаловых сфер $D = 245 \pm 5$ нм). Опаловая матрица была заполнена этиловым спиртом и охлаждена до температуры жидкого азота 77 К. Люминесценция в образце возбуждалась с помощью излучения YAG:Nd³⁺ импульсного лазера с указанными выше параметрами путем инициации пробоя на поверхности опала в течении 30 с. Общее время послесвечения образца видимое наблюдателем в темной комнате составляло около 60 с.

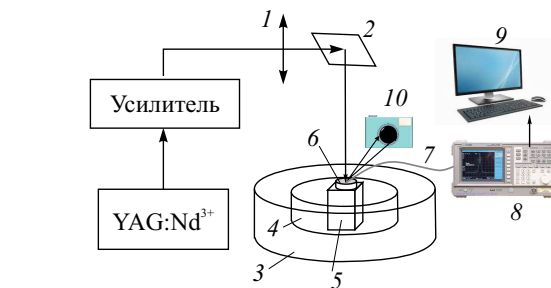
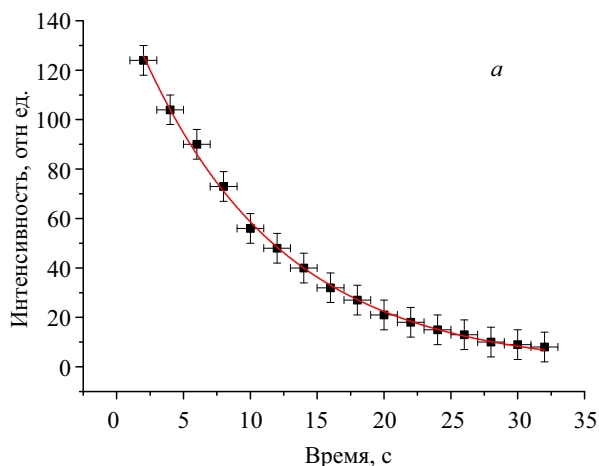


Рис. 1. 1 — Фокусирующая система, 2 — поворотное зеркало, 3 — кювета-термос, 4 — жидкий азот, 5 — хладапровод из меди, 6 — исследуемый образец, 7 — волоконный световод, 8 — спектроанализатор, 9 — управляющий компьютер, 10 — цифровой фотоаппарат

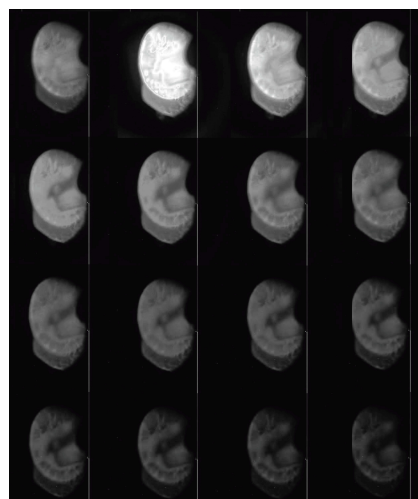


Рис. 2. Люминесценция охлажденной до 77 К опаловой матрицы с размерами сфер $D = 245$ нм, заполненной этиловым спиртом (размер матрицы $0.8 \times 0.8 \times 0.8$ см, возбуждение излучением пробоя на поверхности образца от YAG:Nd³⁺ импульсного лазера (длина волны 532 нм, 15 мДж/имп, 15 нс длительность, частота повторения импульсов 50 Гц) в течение 60 с). Время экспозиции каждого кадра 2 с

На рис. 3, а приведена обработка экспериментальных данных интенсивности послесвечения данного образца от времени, полученная путем интегрирования сигнала (рис. 2) по всей видимой поверхности свечения.

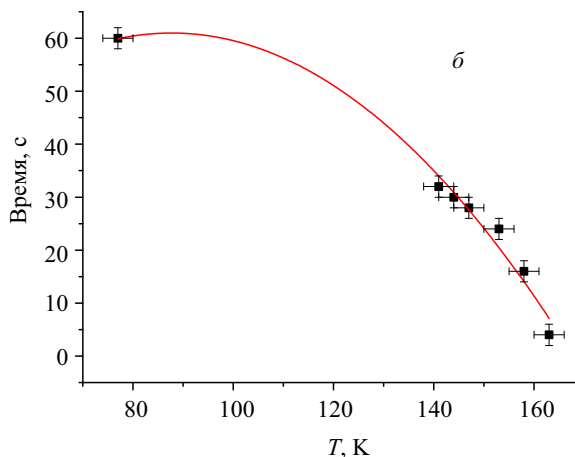


Рис. 3. Зависимость от времени интенсивности свечения охлажденной до 77 К опаловой матрицы заполненной этиловым спиртом при возбуждении люминесценции излучением от пробоя на поверхности образца излучением YAG:Nd³⁺ импульсного лазера (длина волны 532 нм, 15 мДж/имп, 15 нс длительность, частота повторения импульсов 50 Гц) в течении 30 с (а). Зависимость времени послесвечения образца опаловой матрицы, заполненной этиловым спиртом, от температуры (б)

Было также проведено изучение зависимости времени видимого послесвечения опаловой матрицы, заполненной спиртом, от температуры. Для этого мы заморозили рядом с опаловым образцом, заполненным этиловым спиртом, термодару, сопряженную с цифровым мультиметром (точность измерения температуры ± 3 К, точность определения времени люминесценции около 2 с). После заморозки образца опаловой матрицы до криогенной температуры мы помещали образец на металлический массивный хладопровод, также охлажденный в жидком азоте до 77 К, и позволяли образцу постепенно нагреваться. Оценка времени послесвечения проводилась на основании записи эффекта цифровой камерой с экспозицией кадров 2 с. Облучение образца излучением YAG:Nd³⁺ проводилось в течение 30 с. Результаты таких измерений в области температур от 77 до 165 К приведены на рис. 3, б.

Обнаружено, что при повышении температуры время эффект послесвечения падает и в районе 163 К эффект пропадает, как следует из аппроксимирующей кривой, приведенной на рис. 3, б.

Спектральные измерения наблюдавшейся люминесценции охлажденных образцов показали, что основной спектр лежит в видимой области от 400 до 550 нм, что аналогично полученным ранее результатам в [8].

2. ВОЗМОЖНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЛАЗЕРНОЙ ГЕНЕРАЦИИ ПРИ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ В АКТИВНЫХ СРЕДАХ НА ОСНОВЕ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

На основании проведенных измерений мы предполагаем перспективным создание криогенных лазеров на базе органических соединений. В [8, 9] для объяснения микроскопических эффектов излучения возникающего в кристалле искусственного опала под воздействием мощного импульсного лазерного излучения предлагается несколько механизмов: механизм четырехфотонного параметрического рассеяния и механизм последовательных трехчастотных волновых взаимодействий в периодически неоднородных средах. При этом эффективность возникновения вынужденного излучения в сине-зеленой области обеспечивается аномалиями плотности фотонных состояний вблизи краев зоны Бриллюэна. Эффект наблюдается только при низких температурах, так как тогда подавлены релаксационные процессы распада фотонов с переходом световой энергии в тепловую энергию кристаллической решетки [8].

В результате дальнейших исследований авторы [5] пришли к выводу, что длительное послесвечение в сине-зеленой области замороженных до криогенных температур образцов этилового спирта или ацетона под воздействием накачки ультрафиолетовым излучением свидетельствует о возможности иных, беспороговых механизмов возникновения данного явления, не связанных с фотонными кристаллами и импульсным воздействием лазерным излучением.

Создание различных криогенных твердотельных лазеров имеет большие перспективы. Так в [12] отмечено, что криогенное охлаждение твердотельных лазеров имеет ряд важных преимуществ, в том числе почти полное исчезновение оптических искажений в лазерах

с высокой средней мощностью, а также улучшение спектральных и пространственных свойств. Эти преимущества сегодня только начинают использоваться для производства компактных лазеров средней мощности, и ожидаемая эффективность будет превосходить эффективность современных твердотельных лазеров. Такой подход к совершенствованию технологических свойств твердотельных лазеров может помочь решить актуальные вопросы по созданию твердотельного лазера с многоканальной диодной накачкой на основе оптически плотных активных сред [13]. В обзоре [14] сформулирован вывод о том, что создание лазерных сред на основе органических красителей открыло качественно новый этап в развитии квантовой электроники. По нашему мнению, применение криогенного охлаждения активной среды и внедрение органических молекул в аналоги матриц Шпольского поможет создать лазерные источники с улучшенными пространственными и спектральными характеристиками выходного излучения.

При создании лазерных сред, работающих в криогенном диапазоне температур, необходимо решать проблемы искажения лазерного пучка в криогенном усилителе [15]. В [15] для решения поставленной задачи с учетом температурных зависимостей коэффициента теплопроводности, показателя преломления и коэффициента теплового расширения рассчитаны: температура, упругие напряжения, термонаведенная линза и дполяризация пучка при реализации генерации в криогенном лазерном дисковом усилителе.

Аналогичная задача решена в [16], где проведено теоретическое моделирование и экспериментальное исследование лазера на тонком диске с диодной накачкой. В рамках созданной модели рассчитано влияние различных параметров на эффективность работы лазера, а также получен подход для расчета оптимальной конструкции лазера, геометрии активной среды, схемы диодной накачки и условий эксплуатации. Показано, что технические параметры лазеры существенно улучшаются при температурах активной лазерной среды ниже нуля по Цельсию. Исследованию различных аспектов и проблем при создании криогенных лазеров посвящены также работы [17, 18].

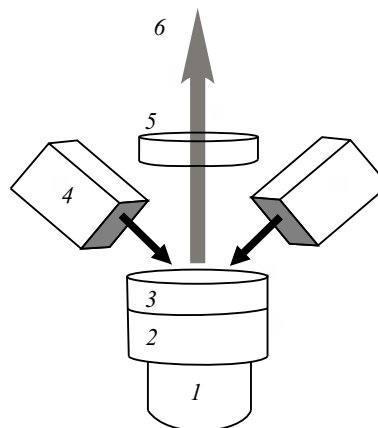


Рис. 4. 1 — хладопровод, 2 — глухое термостойкое зеркало, 3 — активная лазерная среда аналог матрицы Шпольского, 4 — диодные линейки накачки, 5 — выходное полупрозрачное зеркало, 6 — лазерный луч

Кроме свечения органических веществ при криогенных температурах, в [19] обсуждается обнаруженная люминесценция чисто органических веществ в видимой области спектра, а также перспективы практического применения данного явления. В [20] сообщается о создании синтетических органических молекул, обладающих эффектом сверхдлинного времени фосфоресценции (до 1.35 с) и обсуждаются возможные механизмы реализации такого явления.

Ориентировочная схема реализации лазерной генерации при криогенной температуре на основе аналога матрицы Шпольского приведена на рис. 4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований представляется перспективным создание на основе аналогов матриц Шпольского высокоэффективных активных лазерных сред. При этом необходим учет современных подходов к созданию криогенных дисковых твердотельных лазеров, способов решения проблем возникающих при их проектировании и реализации, а также достижений в изучении люминесценции органических веществ при комнатной и криогенной температурах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шпольский Э. В., Ильина А. А., Климова Л. А. // ДАН СССР. 1952. **87**, № 6. С. 935.
2. Shpol'skii E. V. // Sov. Phys. Usp. 1962. **5**. P. 522.
3. Naumov A. V. // Sov. Phys. Usp. 2013. **56**, N 6. P. 605
4. Orrit M., Bernard J., Personov R. I. // J. Phys. Chem. 1993. **97**. P. 10256.
5. Воропинов А. В., Ципенюк Д. Ю. // Лазеры в науке, технике, медицине. Сб. научных трудов. М. 2018. **29**. С. 93.
6. Cherniega N. V., Kraiskii A. A., Kraiskii A. V. et al. // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2010. **37**, N 3. P. 89.
7. Tcherniega N. V., Kudryavtseva A. D., Tsipenyuk D. Yu. // Proceedings of ICNP/AOM Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China. 2013.
8. Gorelik V. S., Kudryavtseva A. D., Tareeva M. V., Tcherniega N. V. // JETP Letters. 2006. **84**, N 9. P. 485.
9. Cherniega N. V., Kudryavtseva A. D. // J. Surf. Investigation. X-ray, Synchrotron, and Neutron Techniques. 2009. N 3. P. 513.
10. Minkoff G. J. Frozen Free Radicals. Interscience Publishers Inc. N-Y., 1960.
11. Курко Д. Л., Савелов А. С., Кадетов В. А. // Письма в ЖТФ. 1995. **21**. P. 78.
12. Brown D. C. // IEEE J. Sel. Top. In Quantum Electron. 2005. **11**, N 3. P. 587.
13. Garnov S. V., Mikhailov V. A., Serov R. V. et al. // Quantum Electronics. 2007. **37**, N 10. P. 910.
14. Ishchenko A. A. // Quantum Electronics. 1994. **24**, N 6. P. 471.
15. Vyatkin A. G., Khazanov E. A. // Quantum Electronics. 2009. **39**, N 9. P. 814.
16. K Contag K., Karszewski M., Stewen C. et al. // Quantum Electronics. 1999. **29**, N 8. P. 697.
17. Tso Y. F., Ripin, D. J., Aggarwal R. L. et al. // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2007. **13**, N 3. P. 448.
18. Soloviev A., Snetkov I., Zelenogorsky V. et al. // Optics express. 2008. **16**, N 25. P. 21012.
19. An Z., Zheng C., Tao Y. et al. // Nature Materials. 2015. **14**. P. 685.
20. Bolton O., Lee K., Kim H.-J. et al. // Nature Chemistry. 2011. **3**. P. 205.

Development of a Laser Generator Based on the Analog of the Shpol'sky Matrix

Yu. K. Aleshin^{1,a}, D. Yu. Tsipenyuk^{2,b}, V. N. Platonov², A. V. Voropinov³

¹Lomonosov Moscow State University. Moscow, 119991, Russia.

²Prokhorov General Physics Institute of RAS. Moscow 119991, Russia.

³"Laser Graph" Ltd. Moscow 119991, Russia.

E-mail: ^avovur@mail.ru, ^btsip@kapella.gpi.ru.

The possibilities and prospects of laser generation in active media based on organic dyes that are cooled to cryogenic temperatures are considered. The results demonstrate the possibility of creating highly effective active laser media (based on the analog of the Shpol'sky matrix) on the basis of cooled carbon containing matrices.

Keywords: laser generation, cryogenic temperature, Shpol'sky matrix.

PACS: 42.55.-f.

Received 14 September 2018.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2019. **74**, No. 1. Pp. 52–56.

Сведения об авторах

1. Алешин Юрий Константинович — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; тел: (495) 939-30-40, e-mail: vovur@mail.ru.
2. Ципенюк Дмитрий Юрьевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел: (499) 503-81-68, e-mail: tsip@kapella.gpi.ru.
3. Платонов Валерий Николаевич — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; e-mail: platonov.valeriy@gmail.com.
4. Воропинов Андрей Васильевич — канд. техн. наук, вед. инженер; тел: (495) 956-42-46, e-mail: info@lasergraphicart.com.